

**О.В. ПОРКУЯН**, д-р техн. наук, доц., ТИ ВНУ им. В. Даля,  
**Т.Г. СОТНИКОВА**, асп., ТИ ВНУ им. В. Даля

### КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ МАГНЕТИТА В ТВЕРДОЙ ФАЗЕ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ПУЛЬПЫ

У даній статті розглянутий спосіб визначення вмісту феромагнітного компонента в потоці залізорудної пульпи на базі методу, заснованого на комбінованому використанні поверхневих ультразвукових хвиль.

The method of determination the contents of ferromagnetic component in the stream of iron-ore medium on the grounds of the method, based on combined use of superficial ultrasonic waves is considered.

**Введение.** Повышение качества железорудной продукции в соответствии с требованиями рынка - является одной из важнейших задач. На современных горно-обогатительных комбинатах процесс обогащения это весьма сложный процесс, который происходит в несколько стадий. Качество полезных ископаемых и продуктов обогащения определяется содержанием ценного компонента, элемента, для получения которого и добывается руда. Показателем качества для железорудной продукции является чаще всего магнетит - минерал, обладающий сильными магнитными свойствами.

Уменьшить эксплуатационные затраты и повысить качественные показатели последующего технологического передела позволяет качественный контроль показателей перерабатываемого сырья на каждой стадии обогатительного комплекса. Поэтому разработка методов и способов контроля содержания ферромагнитного компонента в потоке пульпы является актуальной научной и практической задачей.

Анализ и классификация методов измерения вещественного состава показал, что при построении измерительно - информационных систем на обогатительных фабриках желательнее использовать инструментальные методы контроля [1,2].

В настоящее время практически используются три метода определения степени раскрытия минералов: оптический, гравитационно-оптический и основанный на использовании результатов магнитного анализа [1,2]. Последний метод вследствие своей невысокой точности может быть использован только для экспрессного определения степени раскрытия минералов, обладающих магнитными свойствами.

В основе двух первых методов лежит подсчет под микроскопом количества свободных зерен рудных и нерудных минералов в измельченных продуктах. Результаты исследований показывают, что они имеют высокую точность, но требуют определенного времени для получения результата. Это

возможно для научных исследований, но мало пригодно для оперативного контроля в ходе технологического процесса.

Одними из перспективных, с точки зрения разработки измерительных комплексов, являются ультразвуковые методы [3]. Ультразвуковой контроль нашел широкое применение для определения основных характеристик пульпы – плотности и гранулометрического состава. Для этих целей используются объемные и поверхностные волны. Методы контроля, основанные только на объемном ультразвуке имеют недостатки: необходимость дегазации, необходимость настройки приборов, невысокая точность измерения контролируемых параметров. Исключить некоторые проблемы позволило использование поверхностных ультразвуковых волн. В основе методов контроля свойств технологической среды при использовании поверхностного ультразвука лежит изменение интенсивности волны. Характер зависимости определяется как свойствами среды, в которую излучается волна, так и видом волны [4].

Так как магнетит обладает сильно выраженными магнитными свойствами, то для контроля содержания этого компонента целесообразно использовать комбинированные магнитно-ультразвуковые методы. Один из наиболее эффективных таких методов рассматривался в работе [5]. Однако, метод не учитывает зависимость плотности твердой фазы железорудной пульпы от содержания полезного компонента. Поэтому для повышения эффективности контроля на основе таких подходов в предлагаемой работе рассматривается усовершенствованный метод.

**Постановка задачи.** Целью данной работы является разработка метода, который дает возможность определить долю магнитного компонента в твердой фазе железорудной пульпы. Пульпа рассматривается как проводящая ферромагнитная гетерофазная среда, в которую излучается волна Лэмба, распространяющаяся по стенке сосуда. В работе анализируются процессы, которые происходят при распространении волны Лэмба в исследуемой системе, в том числе при ее намагничивании.

**Основная часть.** Для определения доли магнитного компонента в твердой фазе пульпы предлагается комбинированный способ, в основе которого находится устройство контроля содержания магнитного компонента в пульпе, состоящее из двух измерительных блоков, аналогичное предложенному в [5]. В измерительном блоке 1 реализуется ультразвуковой контроль объемной доли твердой фазы пульпы. В измерительном блоке 2 осуществляется намагничивание пульпы и измеряется ее магнитная проницаемость. В соответствии с этим на рис.1 представлена схема контроля содержания магнитного компонента.

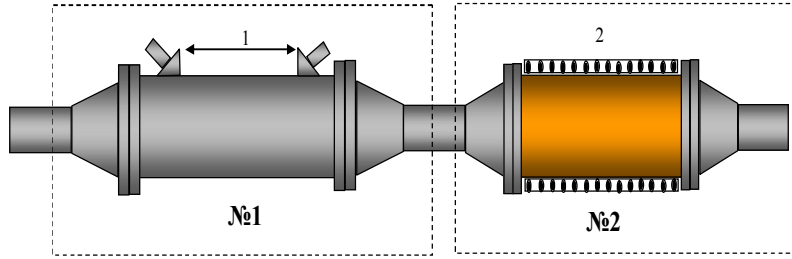


Рис. 1. Схема контроля содержания магнитного компонента в пульпе

Рассмотрим измерительный блок 1. Через измерительный сосуд течет контролируемая среда (пульпа) с постоянной скоростью. Для оценки объемной доли твердой фазы пульпы используются волны Лэмба. Одна из стенок измерительного сосуда представляет измерительную пластину, по которой распространяются волны Лэмба. Эта волна формируется посредством формирующей призмы и излучающего пьезопреобразователя. Волны Лэмба, пройдя фиксированное расстояние  $l$  по стенке измерительного блока 1, поступают через формирующую призму на приемный пьезопреобразователь, который осуществляет преобразование упругих ультразвуковых колебаний в электрический сигнал. Пройдя расстояние  $l$ , волны будут затухать, излучая энергию в жидкость. Коэффициент затухания волн Лэмба на единице длины  $k_2$  определяется по формуле [6]:

$k_2 = -i \frac{\rho_n}{\rho_{nl}} k_l A_s$ , где  $\rho_n$  - плотность пульпы;  $\rho_{nl}$  - плотность материала пластины;  $k_l$  - волновое число продольных ультразвуковых волн в пластине;  $A_s$  - коэффициент, определяемый механическими свойствами материала пластины.

Так как газовая фаза пульпы практически не влияет на ее плотность, то газовые пузырьки не будут оказывать влияние на ослабление волн Лэмба [7]. В этом случае плотность пульпы  $\rho_n$  будет определяться объемной долей частиц твердого в пульпе  $W$ , их средней плотностью  $\rho_{me}$  и плотностью воды  $\rho_e$ :  $\rho_n = (1-W)\rho_e + W\rho_{me}$ . Поэтому коэффициент затухания  $k_2$  для волны можно представить в виде:

$$k_2 = \left[ (1-W) \frac{\rho_e}{\rho_{nl}} + W \frac{\rho_{me}}{\rho_{nl}} \right] C_v,$$

где  $C_v$  - величина, практически не зависящая от плотности жидкости.

Таким образом, интенсивность волн Лэмба на расстоянии  $l$  от источника волн можно определить по формуле:

$$I_v = I_{ov} \exp(-k_2 l) = I_{ov} \exp \left\{ - \left[ (1-W) \frac{\rho_e}{\rho_{nl}} + W \frac{\rho_{me}}{\rho_{nl}} \right] C_v l \right\}$$

или после математических преобразований

$$\ln \left( \frac{I_{ov}}{I_v} \right) = W \frac{(\rho_{me} - \rho_e)}{\rho_{me}} C_v l, \quad (1)$$

где  $I_{ov}, I_v$  - интенсивности волны Лэмба на входе и выходе измерительного модуля;  $\rho_{me}$  - плотность твердой фазы;  $\rho_e$  - плотность воды;  $\rho_{nl}$  - плотность материала пластины;  $C_v$  - постоянная величина, не зависящая от плотности жидкости;  $l$  - расстояние между источником и приемником волн.

Таким образом, выражение (1) определяет величину затухания волн Лэмба, которая определяется концентрацией и плотностью твердой фазы контролируемой суспензии, протекающей в измерительном сосуде.

Измерительный блок 2 представляет собой соленоид, содержащий  $n$  витков на единицу длины. При пропускании через соленоид постоянного тока величины  $J_o$  внутри создается однородное магнитное поле напряженности  $H$ .

Количественным критерием намагничивания вещества будем считать вектор намагничивания  $\vec{I}$ .

Выделим в намагниченной пульпе объем  $\Delta V$  и определим его намагниченность  $\vec{I}$ :  $\vec{I} = \Delta \vec{p}_m / \Delta V$ , где  $\Delta \vec{p}_m$  - суммарный магнитный момент объема  $\Delta V$  магнетика.

Обозначим через  $I_M$  величину намагниченности чистого (100%) магнетита при насыщении. На рис. 2 приведена зависимость  $I$  от напряженности магнитного поля  $H_n$ .

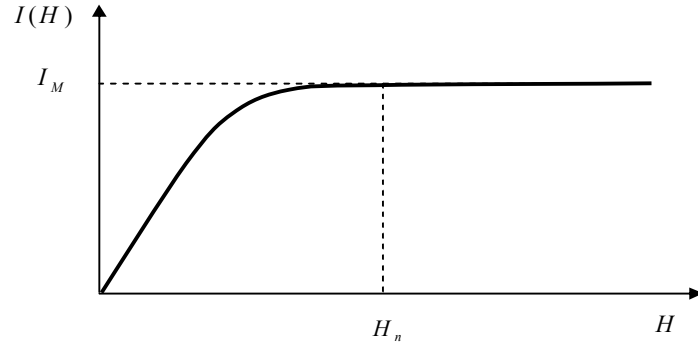


Рис.2. Зависимость намагниченности пульпы от напряженности магнитного поля

Определим магнитный момент объема  $\Delta V$  пульпы, если она находится в магнитном поле  $H > H_n$ :  $\Delta p_m = W \eta \Delta V I_M$ , где  $\eta$  - доля магнитного компонента в твердой фазе пульпы;  $W$  - объемная доля твердого компонента в пульпе. Тогда намагниченность пульпы (как магнитного момента единицы объема вещества) будет определяться выражением:

$$I_{\text{пульп}} = \frac{W \eta \Delta V I_M}{\Delta V} = W \eta I_M. \quad (2)$$

С другой стороны известно, что намагниченность вещества (в том числе и пульпы) определяется через напряженность магнитного поля  $H$ :

$$I_{\text{пульп}} = \chi H, \quad (3)$$

где  $\chi$  - магнитная восприимчивость вещества.

Приравняв левую и правую части выражений (2) и (3), получим

$$\chi H = W \eta I_M. \quad (4)$$

Поделив, левые и правые части выражений (1) и (4), получим

$$\frac{\chi H}{\ln\left(\frac{I_{ov}}{I_v}\right)} = \frac{W \eta I_M}{W \frac{(\rho_{ms} - \rho_s)}{\rho_{nl}} C_v l} = \frac{\eta I_M}{\frac{(\rho_{ms} - \rho_s)}{\rho_{nl}} C_v l}. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что

$$\eta = \left[ \frac{(\rho_{ms} - \rho_s)}{\rho_{nl} I_M} C_v l \right] \frac{\chi H}{\ln\left(\frac{I_{ov}}{I_v}\right)}, \quad (6)$$

где  $\chi = \mu - 1$  - магнитная восприимчивость пульпы, находящейся в магнитном поле;  $H$  - напряженность магнитного поля.

Данная формула и является основанием для определения доли магнитного компонента в твердой фазе пульпы. В статье [5] предполагалось, что плотность твердой фазы  $\rho_{ms}$  является постоянной величиной. Вместе с тем  $\rho_{ms}$  зависит от состава твердой фазы, следовательно, и от  $\eta$ . С учетом этого можно записать:

$$\begin{cases} \rho_{ms} = (1 - \eta) \rho_{nm} + \eta \rho_m \\ \eta = \frac{(1 - \eta) \rho_{nm} + \eta \rho_m - \rho_s}{\rho_{nl} I_M} C_v l \frac{(\mu - 1) H}{\ln\left(\frac{I_{ov}}{I_v}\right)}. \end{cases}$$

Отсюда получим:

$$\eta = \frac{(\rho_{nm} - \rho_s) \cdot (\mu - 1) H C_v l}{\ln\left(\frac{I_{ov}}{I_v}\right) \rho_{nl} I_M - (\rho_m - \rho_{nm}) (\mu - 1) H C_v l}. \quad (7)$$

Задача сводится к определению напряженности магнитного поля  $H$  и магнитной проницаемости  $\mu$ .

Для определения магнитной проницаемости  $\mu$  используем известное соотношение:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (8)$$

где  $B$  - индукция магнитного поля в пульпе;  $\mu_0$  - магнитная постоянная.

Соответственно для нахождения  $B$  и  $H$  исследуем процессы, происходящие в измерительном блоке 2. При пропускании через блок

(соленоид) постоянного тока величины  $J_o$  внутри создается однородное магнитное поле напряженности  $H$  :

$$H = nJ_o. \quad (9)$$

Если  $H$  однозначно определяется только токами проводимости  $J_o$  согласно формуле (9), то для нахождения  $B$  можно использовать баллистический метод измерения. Здесь необходимо учитывать то, из какого материала сделаны стенки сосуда измерительного модуля. Это может быть как немагнитный материал (медь, латунь и т.п.), так и магнитный (сталь). От этого будет зависеть размещение дополнительной измерительной катушки. Если сосуд из немагнитного материала, то дополнительная измерительная катушка размещается снаружи [5], если из магнитного – внутри (рис.3). При изменении магнитного поля, меняется поток магнитной индукции через поперечное сечение соленоида. Под действием изменяющегося магнитного потока в измерительной катушке возникает электродвижущая сила  $\varepsilon = -N(dBS/dt)$ . В результате, в цепи гальванометра протечет кратковременный ток, при этом величина заряда  $q$  будет пропорциональна магнитной индукции  $B$  :  $\frac{dq}{dt}R = -N\frac{dBS}{dt}$ ,  $q = \frac{NSB}{R}$ , где  $N$  - число витков дополнительной катушки;  $S$  - площадь поперечного сечения (определяется внутренним диаметром трубы);  $R$  - полное сопротивление измерительной цепи (сопротивление обмотки дополнительной катушки и входное сопротивление гальванометра, измеряющего величину заряда  $q$ ).

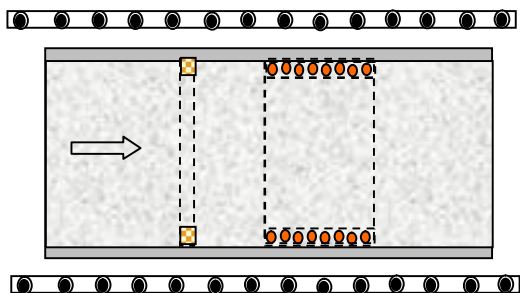


Рис.3. Измерительный модуль 2 для определения магнитных характеристик пульпы с альтернативным расположением дополнительного витка или катушки

Таким образом, измеряя полный заряд кратковременного тока в дополнительной катушке, можно определить  $B$  :

$$B = \frac{qR}{NS}. \quad (10)$$

В результате, с учетом выражений (9) и (10), формула для определения  $\mu$  примет вид:  $\mu = \frac{qR}{\mu_0 NS n J_o}$ , где  $\frac{R}{\mu_0 NS n J_o}$  - постоянная величина, которую обозначим  $C_1$ .

$$\mu = qC_1. \quad (11)$$

Постоянная  $C_1$  определяется в лабораторных условиях. Подставляя (9) и (11) в формулу (7), получим окончательное выражение для нахождения доли магнитного компонента  $\eta$  в пульпе

$$\eta = \frac{(\rho_{nm} - \rho_v) \cdot (qC_1 - 1) n J_o C_v l}{\ln\left(\frac{I_{ov}}{I_v}\right) \rho_{nl} I_M - (\rho_m - \rho_{nm}) (qC_1 - 1) n J_o C_v l}. \quad (12)$$

**Закключение.** В результате исследований получено выражение для определения доли магнитного компонента в железорудной пульпе. На основе справочных данных  $(\rho_v, \rho_{nl}, \rho_m, \rho_{nm}, C_v)$ , а также по результатам измерений

$\left(q, C_1, J_o, l, n, \frac{I_{ov}}{I_v}\right)$  определяется один из основных показателей технологического процесса обогащения железной руды.

Таким образом, предложенный метод определения  $\eta$ , основанный на анализе физических процессов в измерительных блоках, учитывает зависимость твердой фазы от измеряемой величины и позволяет организовать контроль содержания полезной компоненты в пульпе в ходе обогащения.

**Список литературы:** 1. Козин В.З., Тихонов О.Н. Опробование, контроль и автоматизация обогатительных процессов. - М.: Недра, 1990. - 343 с. 2. Хан Г.А. Опробование и контроль технологических процессов обогащения. - М.: Недра, 1979. - 253 с. 3. Моркун В.С., Потапов В.Н. Ультразвуковой контроль параметров случайно неоднородных гетерогенных сред//Горн. журн. - Изв. вузов. - 1992. - № 8. - С. 126-128. 4. Моркун В.С., Поркуян О.В. Контроль гранулометрического состава железорудной пульпы на базе комбинированного использования объемных ультразвуковых волн и волн Лява//Вісник КТУ.- 2007. - №17 – с.224-230 5. Моркун В.С., Поркуян О.В., Сотникова Т.Г., Барский С.Н. Измерение содержания ферромагнитного компонента в потоке пульпы//Вісник КТУ.-2004.- №5-с.7-11 6. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике.- М.: Наука, 1966.- 87с. 7. Моркун В.С., Потапов В.Н. Ультразвуковой контроль характеристик твердой фазы пульпы//Обогащение руд.-1992.-№2.-с.41-45.